

### **Verfahren zur Herstellung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen**

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen umfassend mindestens einen Anteil an Magnesium oder einer Magnesiumlegierung sowie mindestens einen Herstellungsschritt, in dem ein Thixomolding erfolgt.

Der Werkstoff Magnesium ist aufgrund seines niedrigen E-Moduls, des hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie der mangelnden Verschleißbeständigkeit für bestimmte Anwendungsfälle wie zum Beispiel Kolben in Kraftfahrzeugmotoren oder andere Aggregatkomponenten insbesondere von Motoren nicht ohne weiteres verwendbar. Die genannten Eigenschaften lassen sich jedoch positiv beeinflussen, indem der Werkstoff mittels einer zweiten, üblicherweise deutlich festeren und härteren Phase verstärkt wird. Verwendung dafür finden üblicherweise keramische oder kohlenstoffbasierte Kurz- oder Langfasern beziehungsweise Partikel. Diese können bei einer schmelzmetallurgischen Herstellung entweder in Form eines porösen Formkörpers (sog. Preform), der mit flüssiger Metallschmelze infiltriert wird, oder im Falle von Partikeln auch durch Einrühren in die metallische Matrix eingebracht werden. Eine weitere Möglichkeit, einen metallischen Werkstoff durch Fasern oder Partikel zu verstärken, besteht in der Selbst- oder auch „in situ“-Bildung der verstärkenden Komponente. Neben den genannten schmelzmetallurgischen Verfahren lassen sich metallische Verbundwerkstoffe auch pulvermetallurgisch erzeugen.

Bei der Verwendung von Preforms als infiltrierbare Formkörper hat sich das Pressgießen (Squeeze casting) als bevorzugtes Gießverfahren etabliert. Hierbei wird bei etwas geringeren Formfüllgeschwindigkeiten, aber etwas höheren Drücken als beim klassischen Druckguss das schmelzflüssige Metall in den porösen Faser- oder Partikelkörper eingepresst. Dabei wird ein nahezu porenfreier Verbundwerkstoff mit geschlossenen Faser-Matrix-Anbindungen erzeugt.

Beim Einrühren werden üblicherweise keramische Partikel als lose Schüttung der bewegten Metallschmelze durch Einrieseln oder Einblasen zugeführt. Verbundwerkstoffschmelzen dieser Art können direkt in Form von Gussstücken oder Barren vergossen werden. Beim in-situ-Verfahren entsteht der Verbundwerkstoff durch eine Reaktion zwischen zwei oder

mehreren Legierungselementen der metallischen Matrix oder Phasen des Gesamtsystems meist unter Bildung einer neuen, in der Regel intermetallischen Phase.

Die Herstellung und Charakterisierung des Systems Mg-Mg<sub>2</sub>Si ist mehrfach beschrieben worden. Es wird zum Beispiel auf die Offenbarung der DE 41 25 014 A1 verwiesen. Die Entstehung der intermetallischen Phase im Sinne einer Verstärkung kann dem in-situ-Prozess zugeordnet werden. Meist geschieht dies durch Infiltration Si-Partikel-haltiger Faserpreforms oder durch Ausscheiden primären Magnesiumsilizids aus übereutektischen Mg-Si-Legierungen. Während sich beim primären Ausscheiden nach Unterschreiten der Liquiduslinie grobe, blockförmige Mg<sub>2</sub>Si-Ausscheidungen bilden, formt sich das Mg<sub>2</sub>Si bei der reaktiven Umsetzung des Rein-Si in einer Preform globular ein. Eutektisch ausgeschiedenes Mg<sub>2</sub>Si wiederum zeigt in der Regel die charakteristische „Chinesenschrift“-Struktur.

Die DE 101 35 198 A1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung von Magnesiumlegierungen durch Thixomolding, die neben anderen Elementen auch einen Anteil an Silizium enthalten können.

Beim Thixomolding-Prozess wird das metallische Material als Granulat der Thixomolding-Maschine zugeführt und innerhalb eines beheizten Zylinders durch eine Transportschnecke in Richtung der Spritzdüse bewegt. Unter Wirkung der Scherkräfte und der Temperatur, die zwischen Liquidus- und Solidustemperatur des Metalls liegt, verflüssigt sich dieses teilweise, während sich der verbleibende Feststoffanteil globular einformt. Das Verhalten des thixotropen Materials ist strukturviskos, das heißt die Viskosität sinkt mit zunehmender Scherwirkung. Das Thixomolding eignet sich vor allem für die Herstellung sehr dünnwandiger Bauteile mit hoher Maßhaltigkeit, da es aufgrund des günstigen Temperaturniveaus zwischen Liquidus und Solidus kaum zu Schwindungs- und Verzugerscheinungen kommt.

Nachteile der oben genannten Verfahrensrouten zur Herstellung von metallischen Verbundwerkstoffen liegen im Falle der Preforminfiltration in der aufwändigen Anlagentechnik, der eingeschränkten Gestaltungsfähigkeit, dem Fasergehalt der Preforms sowie deren hohem Kostenniveau. Komplexe Geometrien sind derzeit kaum oder nur unter erhöhtem technischen und finanziellen Aufwand realisierbar, so dass eine Net-Shape-Herstellung faser- oder partikelverstärkter Bauteile durch Infiltration derzeit kaum möglich ist. Dies hat in der Regel einen relativ hohen Bearbeitungsaufwand zur Folge, der sich bei der Verwendung keramischer Hartphasen als Verstärkungen schwierig und kostenintensiv darstellt, da zum Beispiel die Bearbeitung eines mit SiC- oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Fasern verstärkten

Körpers nur mittels diamantbesetzter Werkzeuge möglich ist. Überdies ist die Infiltrationsfähigkeit von Preforms mit hohen Faser- und Partikelgehalten im klassischen Druckguss nicht ohne weiteres gegeben, bevorzugt wird hierfür das Verfahren des Pressgießens (Squeeze casting) angewendet, wofür wiederum spezielle Gießanlagen notwendig sind. Die Schwierigkeiten, die sich bei der Infiltration mittels Druckguss ergeben können, haben ihre Ursache vornehmlich in der hohen Füllgeschwindigkeit des Verfahrens und dem geringen Druck, der über die Schmelze aufgrund des kleinen Anschnitts ausgeübt werden kann. Dieser wird jedoch benötigt, um die normalerweise sehr geringe Benetzungsneigung zwischen metallischer Schmelze und keramischem Formkörper zu überwinden. Darüberhinaus muss die Preform deutlich über die Schmelzetemperatur erwärmt werden, um ein vorzeitiges Erstarren der Schmelze am Faserkörper zu vermeiden.

Das Verfahren des Einrührens ist in erster Linie den partikelförmigen Verstärkungen vorbehalten, da die Verwendung von Fasern zu einer starken Viskositätserhöhung der Schmelze führen kann, die eine homogene Verteilung der Fasern sehr erschwert oder sogar unmöglich macht. Im Falle von Partikeln ist das Rührergebnis abhängig von der verwendeten Partikelgröße, der Rührerdrehzahl und der Temperatur. Ungenügende Parameterwahl kann zu Verklumpungen, Ausschwemmungen der Partikel in die Schlacke oder deren Sedimentation am Tiegelboden führen. Handelt es sich bei Partikeln und Schmelze um ein reaktives System, treten unter Umständen aufgrund der langen Kontaktzeit zwischen beiden Phasen Umsetzungsreaktionen an den Grenzflächen ein, die eine Schädigung der Partikel zur Folge haben. Beispiel hierfür ist etwa das System Magnesium – Aluminiumoxid, hier wird bei der Reaktion zwischen beiden Partnern unter Zersetzung der Partikelsubstanz Magnesiumoxid und Aluminium gebildet.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur Herstellung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen der eingangs genannten Gattung zur Verfügung zu stellen, welches die Herstellung von Leichtmetall-Verbundwerkstoffen insbesondere für den Einsatz in temperaturbelasteten Bauteilen ermöglicht, welches variabler und kostengünstiger als die bislang bekannten Verfahren ist und die mit diesen verbundenen obengenannten Nachteile vermeidet.

Die Lösung dieser Aufgabe liefert ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Herstellung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen der eingangs genannten Gattung mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1. Erfindungsgemäß erfolgt die Herstellung des Leichtmetall-Verbundwerkstoffs im Thixomolding-Verfahren, wobei in eine Metallmatrix eine  $Mg_2Si$ -Phase mit einem Volumengehalt von mindestens 2 % eingelagert wird.

Die besonderen Vorteile des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der Kombination des Thixomoldingverfahrens mit dem Verfahren zur in-situ-Erzeugung eines metallischen Verbundwerkstoffes. Erfindungsgemäß sollen Mg-Mg<sub>2</sub>Si-Verbundwerkstoffe mit einem Volumengehalt von mindestens 2 % Mg<sub>2</sub>Si hergestellt werden, vorzugsweise indem ein Granulat des Siliziums oder einer Siliziumlegierung und ein Granulat des Magnesiums oder einer Magnesiumlegierung gemeinsam dem Thixomolding-Prozess zugeführt werden und dort unter Scherung eine zumindest teilflüssige Schmelze bilden, die in Form eines Magnesiumkörpers erstarrt. Vorteile des Verfahrens sind die große Bandbreite der einstellbaren Volumengehalte an Mg<sub>2</sub>Si, die Möglichkeit, auf Faser- oder Partikelpreforms verzichten zu können und über die Größe und die Menge der Si-Partikel die Menge und Größe der sich bildenden Mg<sub>2</sub>Si-Kristalle bestimmen zu können, wodurch sich wiederum Eigenschaften wie der thermische Ausdehnungskoeffizient, das E-Modul, die Zug- und Dehngrenze sowie das Verschleißverhalten individuell verändern lassen. So sind Si-Gehalte einstellbar, die schmelzmetallurgisch nicht herstellbar sind. Der so vergossene Werkstoff kann nachfolgenden Umformoperationen wie etwa einem Schmiedeprozess zugeführt werden.

Vorzugsweise stellt man in dem erfindungsgemäßen Thixomolding-Prozess einen gegossenen Körper aus dem Metall-Matrix-Verbundwerkstoff her, der anschließend weiter verarbeitet wird. Insbesondere wird der gegossene Körper anschließend in mindestens einem Verfahrensschritt umgeformt. Ein solcher Umformprozess kann beispielsweise mindestens ein Schmiedeverfahren umfassen.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung sind weiterhin Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe, die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt wurden.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist weiterhin die Verwendung von nach einem Verfahren mit den Merkmalen eines der Ansprüche 1 bis 11 hergestellten Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen zur Herstellung von Bauteilen für Kraftfahrzeuge. Vorzugsweise sind dies Kraftfahrzeugbauteile aus Leichtmetall-Verbundstoffen, die hohen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind, beispielsweise Motorenteile wie Kolben oder dergleichen.

Die in den Unteransprüchen genannten Merkmale betreffen bevorzugte Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Aufgabenlösung. Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Detailbeschreibung.

Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen näher beschrieben.

Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe, die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt wurden, können beispielsweise zur Herstellung von Kolben oder anderen Motorenteilen für mit Dieselmotoren oder Benzinmotoren betriebene Motoren verwendet werden. Die Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe eignen sich weiterhin beispielsweise zur Herstellung von Laufbuchsen für Wellen, Zylinder und andere rotationssymmetrische Teile, insbesondere in Motoren. Sie sind weiter geeignet zur Herstellung von anderen auf Verschleiß beanspruchten Kraftfahrzeugteilen wie zum Beispiel Bremscheiben.

Der Volumengehalt der  $Mg_2Si$ -Phase in der Metallmatrix liegt vorzugsweise im Bereich zwischen etwa 5 und etwa 40 Volumenprozent. Die erfindungsgemäßen Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe sind beispielsweise erhältlich ausgehend von Standardlegierungen wie AZ91, AM50, MRI230D, MRI253M oder anderen Mg-Druckgusslegierungen, die eine Zugabe von Si erhalten. Wesentlich ist dabei die Reaktion  $2 Mg + Si \rightarrow Mg_2Si$ . Im Rahmen der Erfindung kommt eine Zugabe von mindestens etwa 2 Gewichtsprozent Si und vorzugsweise maximal etwa 15 Gewichtsprozent Si in Betracht. Die daraus resultierenden Volumenprozentanteile an  $Mg_2Si$  sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet, die beispielhafte Anteile  $Mg_2Si$ -Phase in dem Metall-Matrix-Verbundwerkstoff wiedergeben.

Tabelle 1

Zugabemengen von Si in wt.-% und die daraus resultierenden Mengen in Volumenprozent

wt.-% Si	Vol.-% $Mg_2Si$
2	5,08
3	7,63
4	10,19
5	12,77
6	15,35
7	17,95
8	20,55
9	23,17
10	25,80
11	28,44

12	31,09
13	33,75
14	36,42
15	39,10

Mg<sub>2</sub>Si ist eine vergleichsweise hochschmelzende Phase mit einem Schmelzpunkt nahe 1.100 °C. Damit eignet sich diese Phase als Verstärkung zur Verbesserung der Hochtemperatureigenschaften des Matrixwerkstoffes. Dies betrifft sowohl das Kriechverhalten als auch Kennwerte wie die thermische Leitfähigkeit und auch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Neben anderen physikalischen und mechanischen Eigenschaften lassen sich diese Werte gezielt im Hinblick auf eine Anwendung einstellen. Die genauen Zahlenwerte hängen dabei unter anderem sowohl von der Basislegierung, dem Volumenanteil an Mg<sub>2</sub>Si, weiteren Ausscheidungen in der Matrixlegierung, als auch von der Einsatztemperatur bzw. dem Einsatztemperaturbereich ab. Diese Daten sind für die jeweilige Anwendung jeweils experimentell zu ermitteln.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Ausprägung der Mg<sub>2</sub>Si-Ausscheidungen. Üblicherweise trifft man sie als sogenannte „chinese script“-Ausscheidungen an, d. h. als nadelförmige Ausscheidungen, die hinsichtlich ihrer Gestalt sehr an chinesische Schriftzeichen erinnern. Durch die Zugabe von Legierungselementen wie z. B. Ca entstehen jedoch primäre polygonale Ausscheidungen, die sich wie eine Partikelverstärkung verhalten. Beide Ausscheidungstypen wirken sich zudem auch auf mechanische und physikalische Eigenschaften aus.

Bei der Herstellung von Halbzeug aus den erfindungsgemäßen Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen wirken sich die bei der Weiterverarbeitung gewählten Parameter maßgeblich auf das Eigenschaftsprofil aus. Erfolgt eine Umformung beispielsweise durch Strangpressen, dann führt die Ausrichtung von Ebenen der Mg-Kristallite parallel zur Strangpressrichtung zu einer Anisotropie. Die Größenordnung der Anisotropie ist von verschiedenen Faktoren abhängig, insbesondere von dem Umformverhältnis, der Temperatur im Werkzeug, der Vorwärmung, Wärmeführung nach dem Verpressen und somit der dynamischen und statischen Rekristallisation. Die Legierungszusammensetzung einschließlich des Einflusses an Verunreinigungen ist dabei ebenfalls ein beeinflussender Faktor.

Parameter für die Herstellung:

Die Temperaturführung bei der Herstellung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen nach dem erfindungsgemäßen Verfahren steht in direktem Zusammenhang mit der ausgewählten Legierung, dem Schussgewicht und dem Werkzeug, insbesondere dessen Bauteilgeometrie, Anguss etc., der Geometrie von Schnecke und Zylinder beim Thixomolding, der Vorschubgeschwindigkeit und auch der Schussgeschwindigkeit. Diese Parameter müssen für jedes Bauteil jeweils empirisch ermittelt werden und sind dabei auch von der Bauart der Maschine und deren Datenprofil abhängig. Gleichmaßen hängen die Eigenschaften auch vom Festphasenanteil ab. Dieser beeinflusst die mechanischen Eigenschaften der Matrixlegierung allein wie auch die des Verbundwerkstoffes, d. h. der Kombination aus Matrix und Verstärkung.

Hinsichtlich des Flüssigphasenanteils bedeutet die Reaktion  $2 \text{ Mg} + \text{ Si} \rightarrow \text{ Mg}_2\text{ Si}$ , dass zwar die Legierungen schneller einen hohen Anteil an Flüssigphase aufbauen, es jedoch gleichzeitig zu einem steigenden Anteil an Festphase durch die Bildung von  $\text{ Mg}_2\text{ Si}$  kommt. Die Reaktion läuft nicht nur im Bereich Zylinder-Schnecke der Thixomolding-Maschine ab, sondern kann auch nach dem Abguss im Werkstück ablaufen. Vor allem in Bereichen mit Materialanhäufungen ist mit diesem Verhalten zu rechnen. Unter Umständen ist daher ein Nachdruck erfolgreicher aufbringbar, da sich durch die exotherme Reaktion immer noch ein Teil an Matrixlegierung in der schmelzflüssigen Phase befindet. Diesbezügliche Rückschlüsse lassen sich durch Untersuchung von metallographischen Schliffen gewinnen.

Hinsichtlich der Matrixlegierung spielt das Schmelzintervall eine große Rolle. Beispielsweise sei die Legierung AZ91 aufgeführt, deren Schmelzintervall im Bereich von 440 bis 600 °C liegt. Aus der Literatur ist bekannt, dass für diese Legierung ein hoher Anteil an Flüssigphase im Bereich von 95 % zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im Bauteil führt. Bei einem derartigen Flüssigphasenanteil kann man von einer unterkühlten Schmelze reden. Nach dem Einspritzen in das Werkzeug ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren daher eine hohe Keimbildungsrate die Folge bei gleichzeitig sehr hoher Anzahl von Keimen. Dies führt zur Ausprägung eines sehr feinen Gefüges, das aufgrund der Hall-Petsch-Beziehung sehr gute mechanische Eigenschaften aufweist. Bedingt durch die Unterkühlung der Schmelze ist zudem die Schwindung insgesamt sehr gering. Sie ist um so geringer, je geringer der Anteil an Flüssigphase ist. Dies bedeutet gleichzeitig, dass im Vergleich mit Druckguss weniger innere Spannungen und damit auch weniger Verzug auftritt.

Im Zusammenhang mit der Zugabe von Si kommt es zu einer exothermen Reaktion zwischen Mg und dem Si beim ersten Auftreten von Schmelze. Dies bedeutet, dass die Heizleistung der Maschine verringert werden kann. Eine Größenordnung hierfür ist abhängig von verschiedenen Parametern, insbesondere von der Umgebungstemperatur, der thermischen Isolierung der jeweils verwendeten Maschine wie auch den thermischen Leitfähigkeiten der verschiedenen beteiligten Komponenten (Werkstoffe). Gerade im Bereich von Wärmeübergangskoeffizienten bei erhöhten Temperaturen in einem geschlossenen System, wie es eine Thixomolding-Maschine darstellt, sind die Zusammenhänge sehr komplex.

Die Korngröße der Granulate ist in der Regel keine bestimmende Größe. Je nach Maschine und ausgewähltem Bauteil kann dann jeweils eine andere Schneckenengeometrie gewählt werden. Die Korngröße und die Kornform muss dabei auf die Schneckenengeometrie abgestimmt werden. Dies ist völlig unabhängig von der Legierung oder dem Verbundwerkstoff. In der weiteren Folge muss das Korngrößenverhältnis Mg-Si abgestimmt sein. Dies ist jedoch in der Regel nur sinnvoll für eine zuvor festgelegte Schneckenengeometrie.

Die Zugabe von Granulat kann beispielsweise durch eine einfache Fördervorrichtung gleichzeitig oder kurz nach der Granulataufgabe (beide Werkstoffe sind noch fest) erfolgen, die zusätzlich an der Maschine angebracht werden kann. Dabei kann grundsätzlich eine Maschine herkömmlicher Bauart verwendet werden, wie sie beispielsweise von den Firmen Thixomat oder Japan Steel Works am Markt erhältlich ist.



## ANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Herstellung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen umfassend mindestens einen Anteil an Magnesium oder einer Magnesiumlegierung sowie mindestens einen Herstellungsschritt, in dem ein Thixomolding erfolgt, dadurch gekennzeichnet, dass in eine Metallmatrix eine  $Mg_2Si$ -Phase mit einem Volumengehalt von mindestens etwa 2 % eingelagert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Metallmatrix Magnesium oder eine Magnesiumlegierung umfasst.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein Granulat des Siliziums oder eine Siliziumlegierung und ein Granulat des Magnesiums oder einer Magnesiumlegierung gemeinsam in einem Thixomolding-Prozess verarbeitet werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass man über die Größe und/oder die Menge der Partikel des Siliziums oder der Siliziumlegierung die Menge beziehungsweise die Größe der sich bildenden  $Mg_2Si$ -Kristalle und/oder den Siliziumgehalt des Verbundwerkstoffs bestimmt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass man in dem Thixomolding-Prozess einen gegossenen Körper aus dem Metall-Matrix-Verbundwerkstoff herstellt, der anschließend weiter verarbeitet wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der gegossene Körper aus dem Metall-Matrix-Verbundwerkstoff anschließend in mindestens einem Verfahrensschritt umgeformt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der gegossene Körper aus dem Metall-Matrix-Verbundwerkstoff anschließend in mindestens einem Schmiedeverfahren und/oder Strangpressverfahren umgeformt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Herstellung des Verbundwerkstoffs eine Zugabe von wenigstens etwa 2 Gewichtsprozent Si und höchstens etwa 15 Gewichtsprozent Si erfolgt.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass in eine Metallmatrix eine  $Mg_2Si$ -Phase mit einem Volumengehalt von wenigstens etwa 5 % bis höchstens etwa 40 % eingelagert wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Herstellung des Metall-Matrix-Verbundwerkstoffs ausgegangen wird von einer der Magnesiumstandardlegierungen AZ91, AM50, MRI230D, MRI253M oder einer Mg-Druckgusslegierung.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass nach Zugabe von Si beim ersten Auftreten von Schmelze die Heizleistung der Thixomolding-Vorrichtung verringert wird.
12. Metall-Matrix-Verbundwerkstoff, dadurch gekennzeichnet, dass dieser nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11 hergestellt wurde.
13. Bauteil für ein Kraftfahrzeug, dadurch gekennzeichnet, dass dieses mindestens einen Metall-Matrix-Verbundwerkstoff umfasst, der nach einem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11 hergestellt wurde.
14. Verwendung eines Metall-Matrix-Verbundwerkstoffs nach Anspruch 12 zur Herstellung von Motorenteilen, insbesondere Kolben, Laubuchsen für Wellen, Zylindern, anderen rotationssymmetrischen Bauteilen oder Bremsscheiben für Kraftfahrzeuge.